

Шлеенков А. С., Рыбалко В. Г., Новгородов Д. В., Ефремов Т. А.
ИФМ УРО РАН, г. Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПОСЛЕ ПЕРЕГРЕВА

Работа выполнялась с целью исследования возможности оценки технического состояния рабочих лопаток газоперекачивающих агрегатов путем оценки структурно-фазового механизма повреждаемости после перегрева. Проводились химический, металлографический и рентгеноструктурный анализы, также качественно определялось наличие магнитной фазы на поверхности лопаток. Установлено, что механизм повреждаемости рабочих лопаток от перегрева происходит путем появления и роста глубины перекристаллизованного слоя до определенных значений - являющихся критическими, после увеличения, которых происходит высокотемпературное разрушение лопаток, а также характеризуется появлением магнитной фазы изначально немагнитного материала. Установлено что толщина окисленного слоя до 200 мкм является безопасной и является закономерным результатом стационарного температурного режима эксплуатации к концу срока плановой наработки лопаток, заложенного техническими условиями. Увеличение окисленного слоя свидетельствует о нарушении условий эксплуатации (повышении температуры). Последствия нарушения эксплуатации сопровождаются устойчивым ростом обезлегированного и слоя зернограницного окисления, опасного с точки зрения образования микротрещин по границам карбидной фазы. При этом суммарная глубина окисленного слоя с магнитной фазой на поверхности лопаток увеличивается с ростом температуры перегрева.

Ключевые слова: лопатки турбин, срок эксплуатации, перегрев, обезлегирование, магнитная фаза, микротрещины, разрушение.

Рабочие лопатки являются наиболее высокотехнологичным и дорогостоящим элементом конструкции турбины. Лопатки турбины высокого давления эксплуатируются при высоких температурах около 850 °С десятки

тысяч часов, что сопровождается изменением структурно-фазового состояния металла лопаток. Структура сплавов состоит из аустенитной матрицы упрочняющей карбидной и γ' -фазы [1].

Сочетание высокотемпературного воздействия, приводящего к структурно-фазовым превращениям с высокими растягивающими напряжениями, нестабильностью режимов нагрева, возможностью возникновения резонансных колебаний, сравнительно быстрыми пусками и остановками турбины, а также вероятной неравномерностью температурного поля от камеры сгорания, делает рабочие лопатки одними из наиболее нагруженных деталей турбины [2].

Материалом для исследования влияния перегрева являлись рабочие лопатки турбины высокого давления из сплава агрегата ГТК 10-4 со сроком наработки от 4 до 74,5 тысяч часов из сплава ХН65ВМТЮ, эксплуатирующиеся при температуре около 850 °С. В каждом случае для исследования были получены помимо аварийно-поврежденных лопаток, соседние лопатки из того же комплекта, эксплуатирующиеся по определению в тождественных условиях. Характерными особенностями лопаток были признаки высокотемпературного воздействия от перегрева в виде термических пятен темного окраса и цвета избирательно окисленной поверхности («побежалости»), сопровождающиеся повышенной шероховатостью и наличием свойств ферромагнитного материала в пределах термического пятна. При этом в исходном состоянии лопатки из сплава ХН65ВМТЮ не обладают такими свойствами.

Полученные лопатки с признаками перегрева исследовались структурными методами контроля: рентгеноструктурным, металлографическим, энергодисперсионным. Наличие свойств ферромагнитного материала (далее магнитной фазы) на поверхности лопаток определялось качественно при помощи магнитометра. Дополнительно были выполнены лабораторные опыты по оценке влияния перегрева не эксплуатированных лопаток в интервале от 900 до 1100 °С, которые позволяли оценить степень окисления пера лопатки.

Методом рентгеноструктурного анализа было установлено, что наружный слой окарины как на спинке, так и со стороны корыта лопаток состоит из закиси никеля (NiO), далее следует подоисный слой шпинели хрома (NiCr_2O_4) и молибдена (NiMoO_4).

Металлографический анализ приповерхностного слоя исследуемых лопаток в зонах перегрева показал, что под слоем окарины присутствует перекристаллизованный слой, в котором отсутствуют и первоначальное зерно матрицы, и выделения ранее существовавших карбидов (обозначенный как «белый слой»), а также следующий за ним слой повышенной зернограницной травимости материала (зернограницного окисления), обусловленный деградацией граничных карбидов. Слой зернограницного окисления является очаговым для образования микротрещин. Кроме того, в эксплуатируемых лопатках практически на этой же глубине существует зона повышенной травимости аустенитной матрицы, в которой наблюдается укрупненная γ' -фаза (обозначенная как «серый слой»). Общее строение приповерхностного слоя лопаток в зонах перегрева с магнитной фазой представлено на рис. 2.

Диаграммы изменения глубины окисленного слоя для различных зон пера лопатки после перегрева в зависимости от срока наработки как разрушенных, так и неповрежденных рабочих лопаток турбины высокого давления представлены на рис. 3.

Из представленных диаграмм следует, что глубина окисленного слоя с магнитной фазой у неповрежденных лопаток возрастает до 250 мкм к 74500 часам наработки, а у разрушенных лопаток до 500 мкм уже к 33500 часам наработки в зоне выходной кромки.

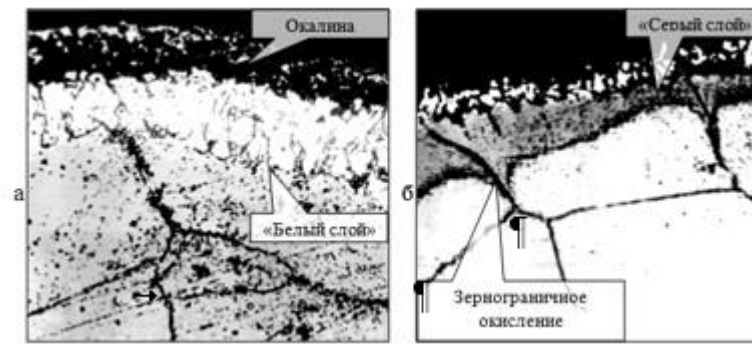


Рис. 2. Общее строение приповерхностного слоя лопаток турбины высокого давления с наработкой до 74,5 тысяч часов: а – слой окалины и «белый слой»; б – «серый слой» и зернограничное окисление; x500

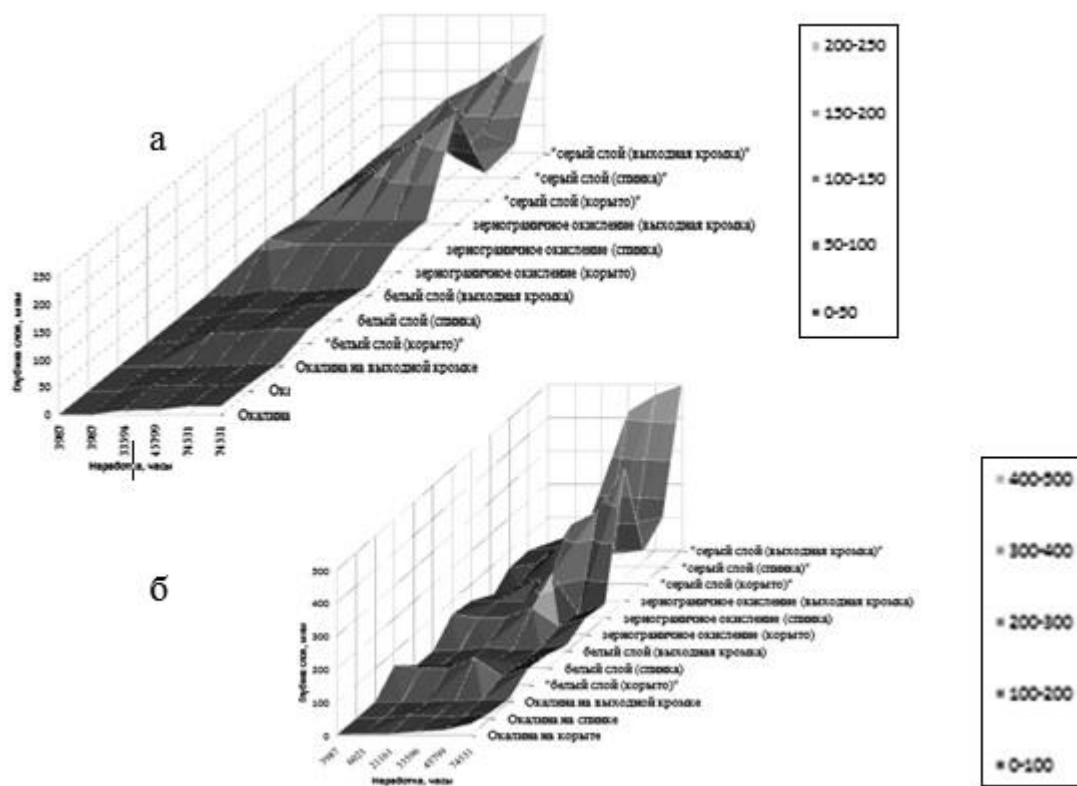


Рис. 3. Диаграмма изменения глубины окисленного слоя (в том числе составляющих его слоев) для различных зон пера лопатки в зависимости от наработки: а – неповрежденные лопатки; б – разрушенные лопатки

Энергодисперсионный анализ приповерхностного слоя лопаток показал, что в «белом слое» происходит снижение содержания основных легирующих и тугоплавких компонентов: алюминия, титана, молибдена и вольфрама, хрома

при повышении процентного содержания никеля (базового элемента) и сохранении железа.

Зависимость глубины окисленного слоя от температуры нагрева неэксплуатируемых лопаток в лабораторных условиях в интервале от 900 °С до 1100 °С, превышающих номинальную температуру эксплуатации, представлена на рис. 5.

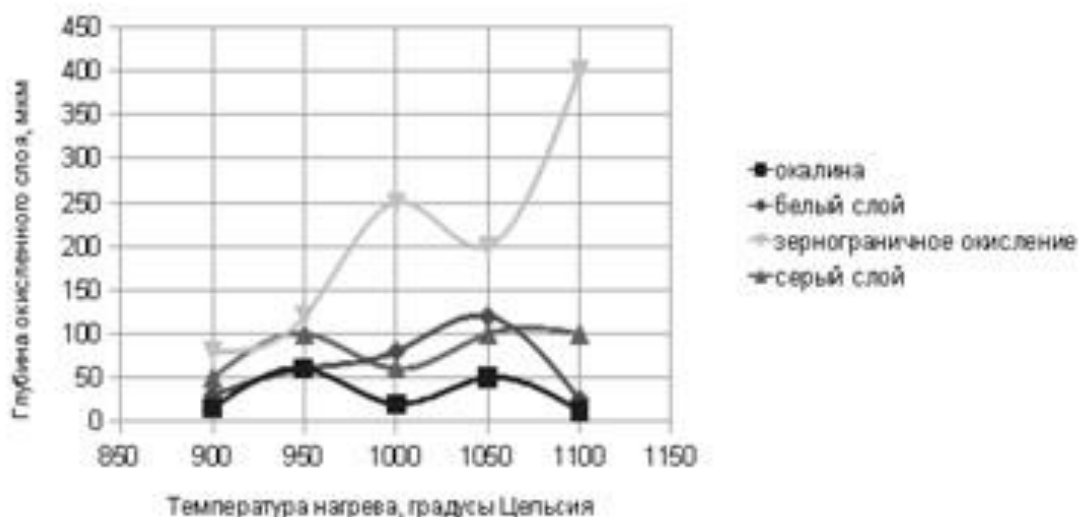


Рис. 5. Зависимость глубины окисленного слоя от температуры перегрева лопаток

Из представленной зависимости следует, что наиболее устойчивая зависимость между температурой перегрева наблюдается для обезлегированного «белого слоя» в интервале от 900 до 1050 °С и слоя зернограничного окисления в интервалах от 900 до 1000 °С и от 1050 до 1100 °С, который является очагом для образования микротрещин. При этом отмечено, что суммарная толщина окисленного слоя пропорциональна увеличению температуры перегрева. В ходе исследования было установлено, что образование магнитной фазы связано с нагревом материала лопаток свыше 950 °С при глубине окисленного слоя около 340 мкм.

По результатам выполненной работы установлено:

1. Металлографическое исследование лопаток показало, что образование магнитной фазы в структуре металла лопатки из сплава ЭИ893

вызвано перегревом на температуру начиная с 950 °С; при этом глубина окисленного слоя составляет около 340 мкм.

2. Глубина окисленного слоя с магнитной фазой у неповрежденных лопаток возрастает до 250 мкм при 74500 часам наработки, а у разрушенных лопаток с признаками локального перегрева в виде термопятна в зоне выходной кромки – до 500 мкм уже к 33500 часам наработки. Данный результат показывает возможность определения факта перегрева лопатки по глубине окисленного слоя. Сравнительные лабораторные испытания показали, что аналогичная структура поверхностного слоя образуется при температуре около 1100 °С с выдержкой в течение 3 часов.

3. Наиболее устойчивая зависимость между температурой перегрева и глубиной окисленного слоя с магнитной фазой наблюдается для обезлегированного «белого слоя» и слоя зернограничного окисления, который является очагом для образования микротрещин вследствие деградации граничных карбидов. При этом суммарная глубина окисленного слоя с магнитной фазой увеличивается с ростом температуры перегрева.

4. Приведенные корреляционные зависимости структурного состояния поверхностного слоя лопатки от температуры эксплуатации позволяют провести оценку технического состояния лопаток на основе зависимости между глубиной окисленного слоя (по факту наличия магнитной фазы) и температурой перегрева.

Литература

1. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976.
2. Рыбалко В. Г., Новгородов Д. В. Анализ причин разрушения рабочих лопаток турбин газоперекачивающих агрегатов // Деформация и разрушение. 2014. № 11.